钟 凯,谭晓慧,牛漫兰,等. 基于降雨强度-历时评价边坡稳定性——以安徽省 3 个边坡为例[J]. 地球科学与环境学报,2023,45(6):1380-1388.

ZHONG Kai, TAN Xiao-hui, NIU Man-lan, et al. Evaluation of Slope Stability Based on Rainfall Intensity-duration—Taking Three Slopes in Anhui Province, China as Examples[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(6): 1380-1388.

**DOI**: 10.19814/j.jese.2023.02025

# 基于降雨强度-历时评价边坡稳定性
## ——以安徽省 3 个边坡为例

钟 凯[1],谭晓慧[1*],牛漫兰[1],许 龙[1],孙 健[2],王 夺[2]

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院,安徽 合肥 230009;
2. 安徽省地质环境监测总站,安徽 合肥 230001)

**摘 要**:为了探究降雨条件对边坡稳定性的影响,确定降雨阈值曲线,利用 FLAC$^{2D}$ 7.0 数值模拟软件对安徽省 3 个小型边坡进行饱和-非饱和渗流及稳定性分析,获取了边坡安全系数随降雨强度和历时的变化趋势。边坡监测位置处孔隙水压力与饱和度的变化结果显示:降雨对边坡的影响是有限的,降雨历时越长,极限降雨强度越小并趋于稳定,边坡趋于饱和,此时安全系数达到最小值,后续降雨对边坡安全系数影响很小;为确保安全,假设临界安全系数为 1.15,对应降雨强度为临界降雨强度,降雨历时越长,临界降雨强度越小并趋于稳定,3 个边坡临界降雨强度趋于稳定时分别为 13、12 和 16 mm·d$^{-1}$,对应的降雨历时分别为 5、9 和 12 d,表明前期降雨对边坡稳定性影响很大。利用这 3 个边坡的临界降雨强度数据进行降雨阈值曲线拟合,并以 435 组安徽省 2008~2022 年历史灾害降雨数据验证该降雨阈值曲线。结果表明:95%以上的灾害数据点可以被该降雨阈值曲线预测。

**关键词**:滑坡灾害;降雨入渗;数值模拟;降雨强度;降雨阈值曲线;安全系数;渗流分析;安徽

**中图分类号**:P642.2 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-6561(2023)06-1380-09

# Evaluation of Slope Stability Based on Rainfall Intensity-duration
## —Taking Three Slopes in Anhui Province, China as Examples

ZHONG Kai[1], TAN Xiao-hui[1*], NIU Man-lan[1], XU Long[1], SUN Jian[2], WANG Duo[2]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Geo-environment Monitoring Station of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

**Abstract**: Landslides are one of the most common geological hazards, with rainfall being the main trigger for their occurrence. In order to find the impact of rainfall conditions on slope stability and determine the rainfall threshold curve, the saturated-unsaturated seepage and stability analysis of three small slopes in Anhui province was carried out using FLAC$^{2D}$ 7.0 numerical simulation software, and the changing trend of safety factor of slopes with rainfall intensity and duration was obtained. The results show that the influence of rainfall on slopes is limited; the rainfall intensity corresponding to the minimum safety factor of slopes during the rainfall infiltration process is the

**收稿日期**:2023-02-26;**修回日期**:2023-07-06 **投稿网址**:http://jese.chd.edu.cn/

**基金项目**:安徽省自然资源科技项目(2021-k-7,JZ2022AGKJ0005)

**作者简介**:钟 凯(1999-),男,安徽滁州人,工学硕士研究生,E-mail:zhongkai@mail.hfut.edu.cn。

*通讯作者:谭晓慧(1971-),女,安徽宣城人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:tanxh@hfut.edu.cn。

ultimate rainfall intensity, and the longer the rainfall duration, the smaller the ultimate rainfall intensity becomes and tends to stabilize; the changes in pore pressure and saturation at the monitoring location on the slope further verify that the slope tends to become saturated under ultimate rainfall intensity, resulting in the minimum safety factor. Subsequent rainfall has little effect on the safety factor of slope. To be on the safe side, a critical safety factor of 1.15 was assumed, and the corresponding rainfall intensity was defined as the critical rainfall intensity. Similar to the trend of ultimate rainfall intensity, the longer the rainfall duration, the smaller the critical rainfall intensity becomes and tends to stabilize. The critical rainfall intensities for the three small slopes tend to stabilize at 13, 12, and 16 mm · $d^{-1}$, respectively, with corresponding rainfall durations of 5, 9, and 12 d. It is indicated that under the influence of long-term early-stage rainfall, a small amount of rainfall can cause slope instability and failure. Additionally, the critical rainfall intensity data of these three small slopes (simulated data points for geological disaster rainfall) were used to fit the rainfall threshold curve, and the accuracy of the rainfall threshold curve was validated with 435 sets of historical rainfall data for geological disasters in Anhui province from 2008 to 2022. The verification results show that over 95% of actual disaster rainfall data can be predicted by the rainfall threshold curve.

**Key words**: landslide hazard; rainfall infiltration; numerical simulation; rainfall intensity; rainfall threshold curve; safety factor; seepage analysis; Anhui

## 0　引　言

安徽省位于中国东南部，地处长江中下游，省内分布有皖西和皖南两大中低山区，山高坡陡，岩石节理、裂隙发育，风化较强烈。由于地质环境脆弱，安徽省地质灾害频发，2001～2015 年共发生崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等突发性地质灾害 14 797 起，直接经济损失 158 950 万元，死亡 69 人。截至 2015 年 12 月 31 日，安徽省现存地质灾害隐患点共有 4 682个，威胁 19 556 户 78 119 人生命安全，威胁财产价值 306 959.2 万元[1]。按灾害类型划分，安徽省滑坡有 1 386 个，崩塌有 1 691 个，泥石流有 140 个，地面塌陷有 136 个，地面沉降有 3 个，不稳定斜坡有 1 326 个；按照稳定程度划分，安徽省不稳定地质点有 3 466 处，基本稳定地质点有 1 216 处。边坡灾害的危害程度和发生频率之高使得安徽省边坡稳定性的研究刻不容缓。

导致边坡灾害事件发生的因素包括人类活动、气候变化、地震和降雨等，其中降雨是最为普遍和主要的影响因素。因此，国内外众多学者对降雨诱发滑坡的现象、规律和机理进行了广泛深入的研究。部分学者利用 Green-Ampt 模型[2-3]描述降雨入渗过程及湿润峰的移动规律，以确定降雨过程中边坡的安全系数和破坏模式。还有部分学者揭示了边坡的延迟失效机制[3]，即降雨诱发滑坡具有一定的时滞效应，评估了前期降雨对边坡稳定性的影响[4-5]。一些学者还研究了特殊岩土边坡在降雨入渗过程中的稳定性变化，包括膨胀土边坡[6]、红黏土边坡[5,7]、采矿场边坡[8-9]等。也有学者提出，降雨过程有时还联合其他因素（如地震[10-11]、台风[12]、水库水位变动[13]等）共同对边坡施加作用，对边坡稳定性极为不利。此外，还有学者探究了极端强降雨对边坡稳定性、孔隙水压力、地下水位线的影响[14-15]。除了常规简单边坡以外，部分学者还对复杂多层边坡[16-17]和实际工程案例[4,15]做了详细的降雨入渗研究。

为了建立有效的边坡预警系统，Lan 等综合利用激光雷达和 GIS 空间建模技术评价边坡落石灾害，并提出了一个基于运动学的滑坡风险管理框架，包括顺序危险分析、风险估计、风险评估和风险控制等，为复杂环境中的大型工程项目提供了一个标准的滑坡风险管理流程[18-19]；张勤等利用 GNSS 技术进行滑坡位移预测、临滑时间预报、预警实施等[20]，并结合遥感、现场监测设备等多种监测方式实现特大滑坡的实时监测[17]；Li 等对频率比法进行改进，解决了传统频率比法的不足，并建立了两个实际场地的滑坡易感性模型[21]。

由于不同地区的气候条件不同，降雨诱发的滑坡灾害存在明显的区域性。为有效预防降雨诱发的滑坡地质灾害，学者们采用不同研究方法建立了区域性的降雨诱发滑坡预警系统。例如，兰恒星等利

用改进的 SINMAP 法构建了不同降水条件下的区域滑坡灾害分布图，得到了研究场地的阈值降水量[22-23]；李子豪等利用历史地质灾害数据绘制降雨阈值曲线，得到场地的降雨阈值，建立前期有效降水和日降水阈值的降水预警模式[24-26]；Jiang 等利用 Geo Studio 软件计算不同状态下边坡的安全系数，并采用梯度增强回归树算法模型对边坡安全系数进行了预测[9]。当模型建立后，需要借助反分析验证预警系统数值模型的正确性。如果模型和实地观测结果之间具备良好的一致性，则可以使用该模型建立成本效益高的预警系统[8]。

目前，虽然有很多学者开展了降雨诱发滑坡的相关研究，但针对复杂降雨入渗条件下边坡内部孔隙水压力及饱和度变化对边坡稳定性的影响、通过数值模拟结果建立地区降雨阈值曲线的研究仍然较少。基于此，本文利用 FLAC$^{2D}$ 7.0 数值模拟软件对安徽省 3 处边坡开展饱和-非饱和渗流分析及稳定性分析，结合监测孔内坡体吸力、孔隙水压力及饱和度数据，明确相应参数与边坡稳定性和极限降雨强度的对应关系；在此基础上，利用数值分析得到的临界降雨数据拟合适用于安徽省的边坡降雨阈值曲线，并将其应用于安徽省历史地质灾害降雨数据点的预测分析，以期为后续降雨诱发的安徽省边坡灾害防控预警提供参考。

## 1 边坡算例及稳定性计算方法

本文分别以安徽省潜山县石庙组边坡（边坡 1）、舒城县何家冲组边坡（边坡 2）及宿松县觅仙泉边坡（边坡 3）等 3 个小型边坡为例进行研究。为了分析降雨入渗对边坡稳定性的影响，确定边坡稳定性与降雨强度和历时的关系，采用 FLAC$^{2D}$ 7.0 数值模拟软件建立边坡稳定性分析模型。各边坡的几何外形、土层分布及网格划分如图 1 所示；相关计算参数如表 1 所示。

**表 1 边坡的计算参数**

**Table 1 Calculation Parameters of Slope**

| 边坡名称 | 土层名称 | 重度/(kN·m$^3$) | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 饱和渗透系数/(cm·s$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 边坡 1 | 碎石土 | 17.50 | 10.0 | 25.0 | $6.0\times10^{-5}$ |
| | 粉质黏土 | 18.50 | 14.5 | 13.0 | $1.2\times10^{-6}$ |
| | 强风化片麻岩 | 21.00 | 14.5 | 26.6 | $1.5\times10^{-3}$ |
| | 中风化片麻岩 | 27.00 | 100.0 | 80.0 | $1.0\times10^{-3}$ |
| 边坡 2 | 碎石土 | 20.00 | 12.0 | 23.0 | $6.0\times10^{-5}$ |
| 边坡 3 | 残坡积粉土、填土 | 18.92 | 27.0 | 21.5 | $6.0\times10^{-5}$ |

模型的初始条件及边界约束条件具体如下：对于初始条件，假定土体的初始吸力或孔隙水压力与深度呈线性分布（初始地下水位面以下的孔隙水压力为正；初始地下水位面以上的孔隙水压力为负，其绝对值即为吸力）；对于力学边界条件，对模型的左、右两侧约束水平位移，对模型的底面约束水平及竖直位移；对于水力边界条件，对模型上表面施加降雨，降雨用降雨强度（$I$）及降雨历时（$D$）表示。根据中国气象局对降雨等级的划分标准（表 2），本文考虑降雨强度为 0～100 mm·d$^{-1}$ 及降雨历时为 1～10 d 的降雨情况，以便使计算的降雨强度和降雨历时具有足够的代表性。

**表 2 降雨等级划分标准**

**Table 2 Classification Standard of Rainfall Grade**

| 雨量等级 | 降雨强度/(mm·d$^{-1}$) |
|---|---|
| 小雨 | ≤10 |
| 中雨 | 10～25 |
| 大雨 | 25～50 |
| 暴雨 | 50～100 |

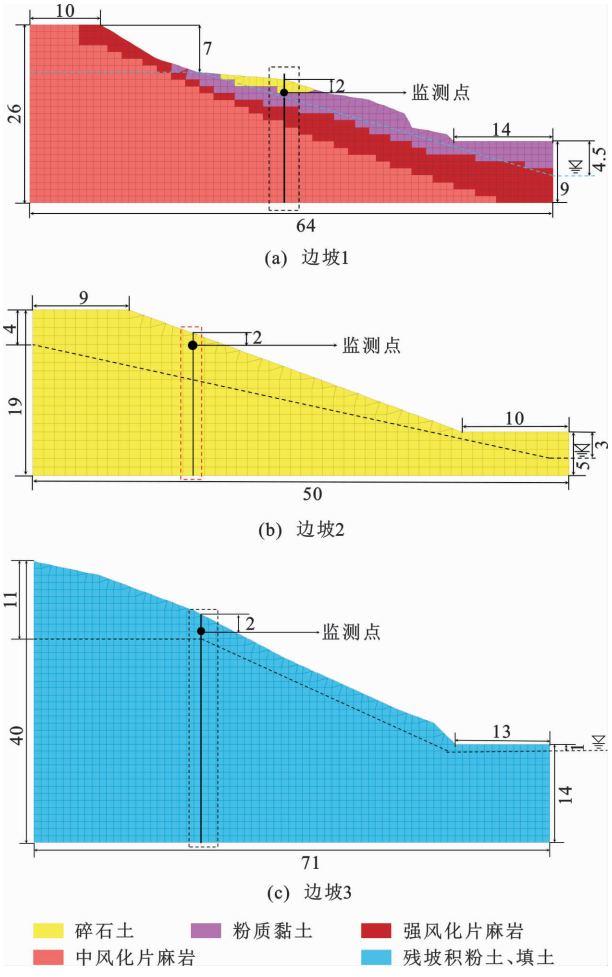
各边坡地下水位面如图 1 所示。地下水位面以上为非饱和土体。在降雨作用下，边坡土体会发生饱和-非饱和渗流。因此，首先对边坡进行降雨条件下的饱和-非饱和渗流分析，获取不同时刻坡体中吸力/孔隙水压力及饱和度的空间分布特征；在此基础上，采用 FLAC$^{2D}$ 7.0 数值模拟软件内置的强度折减法计算边坡的安全系数。

在渗流分析过程中，采用 Van Geneutchen-Mualem 模型（简称 VG 模型）来表示非饱和土的土水特征曲线（SWCC）。其表达式[27-28]为

$$S=\frac{1}{[1+(\psi/a)^n]^m} \tag{1}$$

式中：$S$ 为饱和度；$\psi$ 为吸力；$a$、$n$ 及 $m$ 为土水特征曲线的拟合参数（即 VG 模型参数），其中 $m=1-\frac{1}{n}$，本文中的边坡 VG 模型参数 $a=50$ kPa，$n=1.5$。

需要指出的是，降雨入渗过程中土体渗流与时间有关。由于随着雨水的入渗，土体的抗剪强度不




图中水平虚线表示初始地下水位面；红色虚框内粗竖直线表示监测孔

**图 1　边坡几何外形（单位：m）**

**Fig. 1　Slope Geometry (Unit: m)**

断降低并趋于稳定[29]，所以边坡的安全系数也随着降雨历时的增加而减少，并趋于稳定[28]。Hou 等研究表明，在降雨停止时刻边坡的安全系数最小[4,16,28]。因此，本文以最不利情况为例，只分析降雨停止时刻边坡的安全系数。

## 2　降雨强度-历时对边坡稳定性的影响

### 2.1　安全系数与降雨强度及降雨历时的关系

在降雨入渗条件下，边坡安全系数与降雨强度、降雨历时的关系如图 2 所示。结果显示：3 个边坡在不同降雨强度和降雨历时下安全系数的变化趋势相同。安全系数随着降雨强度的增加而减小，并逐渐趋于稳定；降雨历时越长，安全系数的稳定值越小。

### 2.2　临界降雨强度与降雨历时的关系

基于图 2 的关系曲线可以确定不同安全系数对应的降雨强度与降雨历时的对应关系。根据《滑坡

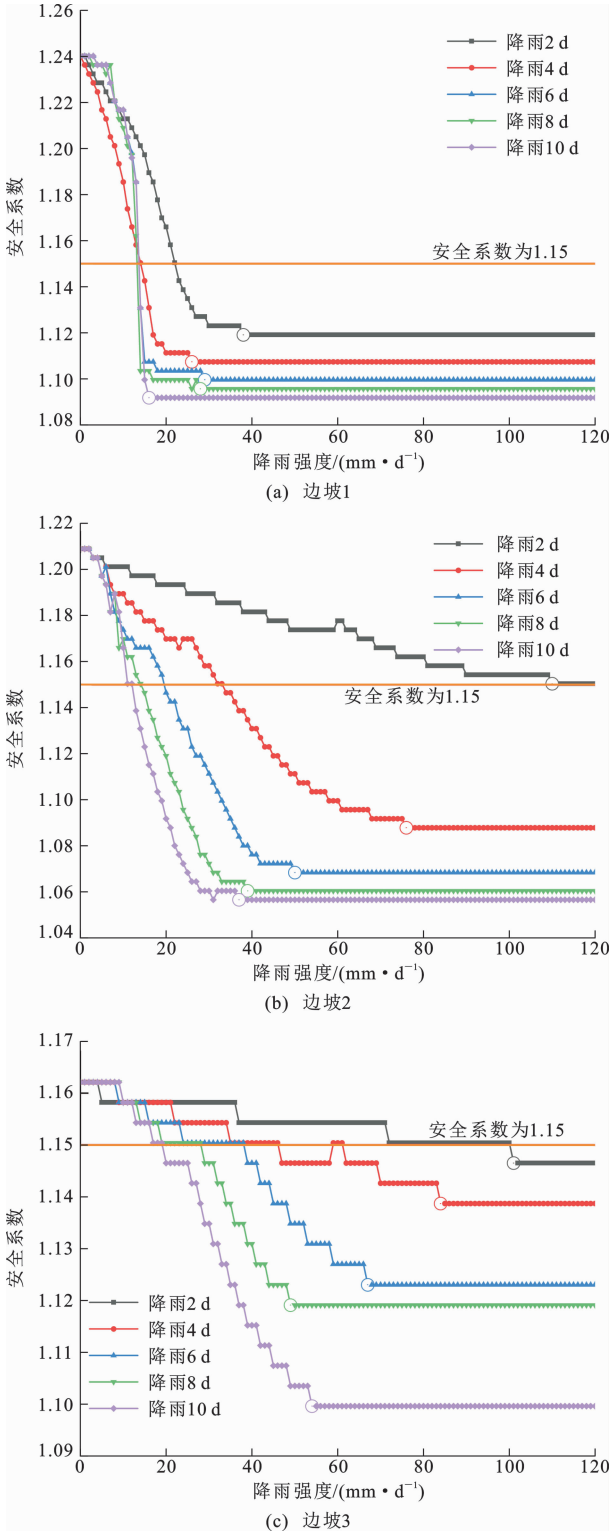



**图 2　不同降雨强度-历时下安全系数的变化**

**Fig. 2　Changes of Safety Factor Under Different Rainfall Intensity-duration**

防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016)[30]对工程边坡稳定状态的划分标准（表 3），安全系数 $F=1.15$ 为边坡处于稳定与基本稳定状态的界限值。为安全起见，取1.15为边坡的临界安全系数（$F_{cr}$）。

表 3 工程边坡稳定状态的划分

Table 3 Division of Stability State of Engineering Slope

| 安全系数 | (0,1) | [1.00,1.05) | [1.05,1.15) | [1.15,∞) |
|---|---|---|---|---|
| 稳定状态 | 不稳定 | 欠稳定 | 基本稳定 | 稳定 |

相应地,图 2 中代表临界安全系数的水平直线与各曲线的交点即代表该边坡的临界降雨条件,由此获得边坡临界降雨强度($I_{cr}$)与降雨历时的关系。

3 个边坡的临界降雨强度与降雨历时的关系曲线如图 3 所示。其中,边坡 2 和边坡 3 是从第 2 天开始,因为第 1 天的临界降雨强度很大。图 3 中各边坡的 $I_{cr}$-$D$ 曲线形状类似,临界降雨强度均随着降雨历时的增加而减小,并最终趋于稳定。3 个边坡临界降雨强度趋于稳定时,对应的降雨历时分别为 5、9 和 12 d;最终稳定时的临界降雨强度分别为 13、12 和 16 mm·d$^{-1}$。这表明在长时间持续降雨作用下,这 3 个边坡即使在降雨强度小于 20 mm·d$^{-1}$时也容易发生失稳破坏。

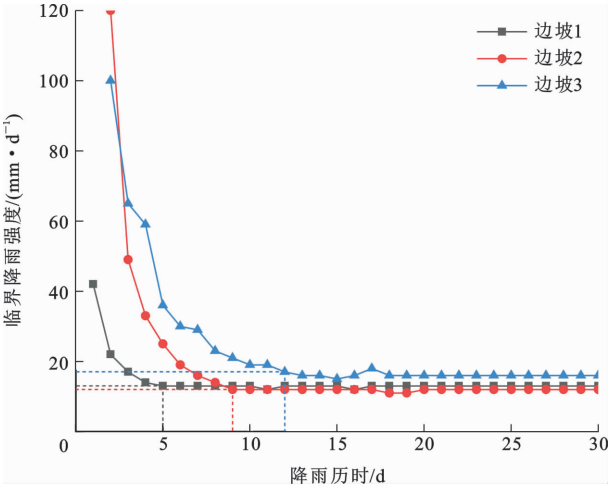



图 3 临界降雨强度与降雨历时的关系

Fig. 3 Relationship Between Critical Rainfall Intensity and Rainfall Duration

### 2.3 极限降雨强度与降雨历时的关系

由图 2 可知,边坡安全系数随着降雨强度的增大而趋于稳定。各曲线上最先达到安全系数稳定值的状态点标记为空心小圆圈,其对应的降雨强度为极限降雨强度($I_s$)。其具体含义是:当降雨强度增大至极限降雨强度时,边坡的安全系数已降低至稳定值;即使降雨强度进一步增大,边坡的安全系数也不会进一步减少。换而言之,降雨只能使边坡的安全系数降至该点,此时坡体已趋于饱和。

不同边坡的极限降雨强度与降雨历时的关系曲线如图 4 所示。从图 4 可知,各边坡的极限降雨强度随降雨历时的变化规律与临界降雨强度随降雨历

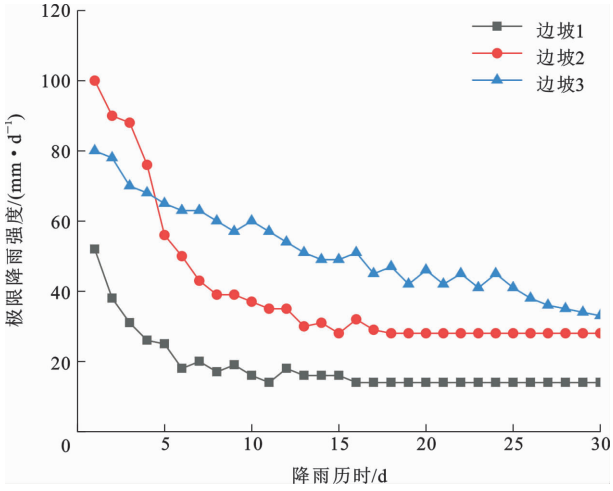



图 4 极限降雨强度与降雨历时的关系

Fig. 4 Relationship Between Extreme Rainfall Intensity and Rainfall Duration

时的变化规律(图 3)较为一致,均是随着降雨历时的增加而减小,并趋于稳定,但二者的变化速度不同,其中边坡 3 的极限降雨强度稳定最慢。各边坡稳定之后的极限降雨强度均小于 40 mm·d$^{-1}$。对于边坡 1 和边坡 2,降雨 10 d 后,分别仅需 16 和 37 mm·d$^{-1}$的降雨强度即可使边坡达到最小安全系数,这也从侧面印证了前期降雨对边坡稳定性的影响之大[4-5]。在较大强度降雨后,即使边坡未失稳,后续很小的降雨量也可能导致边坡破坏。因此,边坡灾害防控要特别关注前期降雨的影响。

## 3 降雨强度对孔隙水压力及饱和度的影响

### 3.1 不同深度处孔隙水压力及饱和度与降雨强度的关系

降雨引起的饱和-非饱和渗流会影响坡体中吸力/孔隙水压力及饱和度的时空分布特征,并进一步影响土体的抗剪强度。根据非饱和土的抗剪强度理论[29],土体的抗剪强度随着吸力的降低而降低。其对应关系为

$$\tau=c'+(\sigma_f-u_a)_f\tan\varphi'+(u_a-u_w)_f\tan\varphi_b \quad (2)$$

式中:$\tau$ 为非饱和土抗剪强度;$c'$ 为有效黏聚力;$(\sigma_f-u_a)_f$ 为破坏时破坏面上的净法向应力状态;$\varphi'$ 为有效内摩擦角;$u_a$ 为非饱和土的孔隙气压力;$u_w$ 为非饱和土的孔隙水压力;$\varphi_b$ 为抗剪强度随基质吸力($(u_a-u_w)_f$)增加的速率。

在边坡工程稳定性分析中,考虑土体中孔隙气压力为大气压力,则在降雨渗流过程中$(\sigma_f-u_a)_f$ 为 0,土体剪切强度将随基质吸力而变化。以边坡 2 为

例，降雨 3 d 时监测孔中孔隙水压力、饱和度及地下水位面随降雨强度的变化规律如图 5、6 所示。

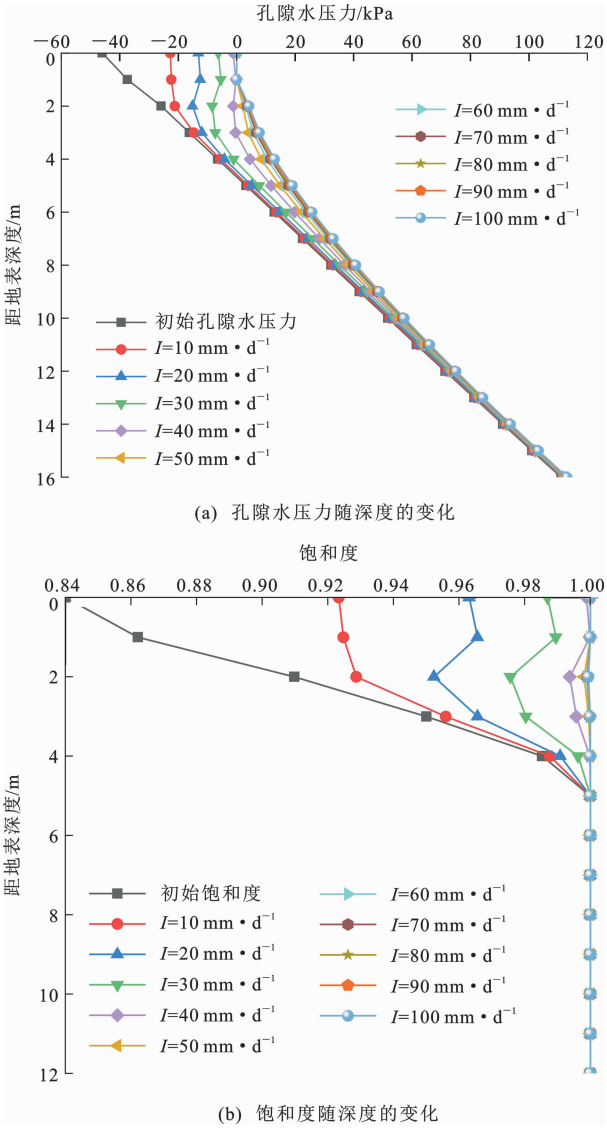



**图 5　不同降雨强度下孔隙水压力、饱和度随深度的变化（$D$=3 d）**

**Fig. 5　Changes of Pore Water Pressure and Saturation with Depth Under Different Rainfall Intensities ($D$=3 d)**

由图 5(a)可知，初始孔隙水压力与深度成正比，在距地表 5 m 处的孔隙水压力为 0 Pa，在此深度以上孔隙水压力为负，其绝对值即为吸力；在此深度以下的孔隙水压力为正。这与图 1 的监测孔中初始地下水位面位置相对应，表明渗流计算初始条件设置正确。随着降雨的入渗，初始地下水位面以上的吸力减小，因此，浅层土体的强度有所减弱；初始地下水位面以下的孔隙水压力增加，表示地下水位面上升。图 5(b)表示监测孔位置处土体饱和度随深度及降雨强度的变化，其变化规律与图 5(a)类似。主要区别是：随着降雨的入渗及地下水位面的

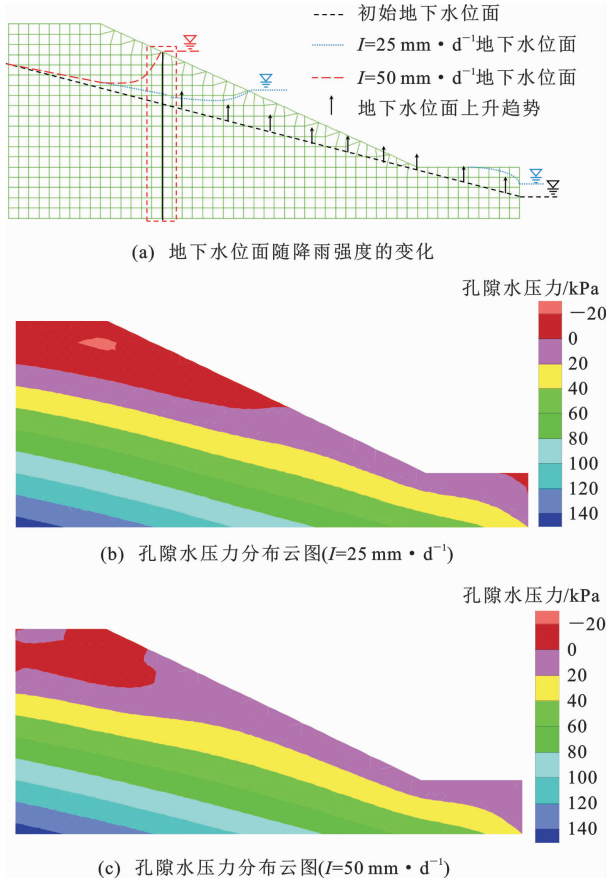



**图 6　地下水位面随降雨强度变化以及孔隙水压力分布云图（$D$=3 d）**

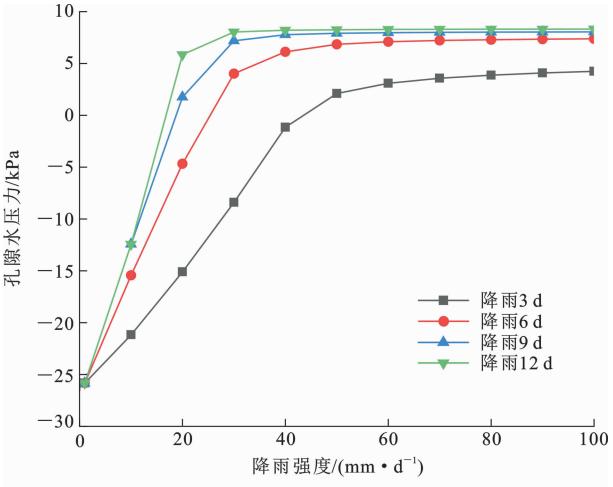
**Fig. 6　Change of Underground Water Level with Rainfall Intensity and Distribution Patterns of Pore Water Pressure ($D$=3 d)**

升高，初始地下水位面以上部分土体的饱和度增加至 1，即由非饱和状态转为饱和状态。由图 5 还可以发现，当降雨强度不高于 40 mm • d$^{-1}$时，降雨强度对边坡中孔隙水压力/吸力及饱和度影响较大；当降雨强度继续增加时，其影响有所减少；当降雨强度增加至 100 mm • d$^{-1}$时，土体中各深度处的孔隙水压力为正，饱和度为 1，即所有土体已达到饱和状态。因此，在降雨历时为 3 d 时，边坡 2 的极限降雨强度为 90 mm • d$^{-1}$左右，这与图 4 所示该条件下的极限降雨强度一致，进一步验证了图 4 的合理性。

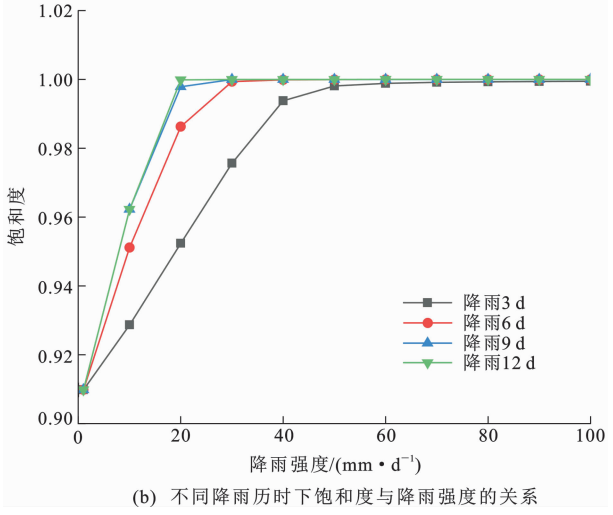
以降雨强度分别为 25 和 50 mm • d$^{-1}$为例，边坡中地下水位面的位置如图 6(a)所示；地下水位面随着降雨强度的增加而升高，降雨强度分别为 25 和 50 mm • d$^{-1}$对应的边坡孔隙水压力分布云图分别如图 6(b)、(c)所示。随着降雨强度的增加，负孔隙水压力区（吸力区）的面积减小，正孔隙水压力区的面积增加，进一步验证了图 5(a)的正确性。

### 3.2 同一深度处孔隙水压力及饱和度与降雨强度和降雨历时的关系

以边坡 2 监测孔中距地表 2 m 处的监测点为例[图 1(b)],不同降雨历时下孔隙水压力和饱和度随降雨强度的变化规律如图 7 所示。由图 7 可见,二者的变化规律一致,均随着降雨历时和降雨强度的增加而增加。在降雨 3、6、9、12 d 的条件下,监测点孔隙水压力趋于稳定的降雨强度分别为 60、40、30 及 20 mm·d$^{-1}$。该数值与图 4 中相同条件下的极限降雨强度相比偏小,这是因为虽然监测部位已经趋于饱和,但是整个边坡并未饱和,水位线仍有向坡顶上升的趋势。结合监测孔中多个监测点处的孔隙水压力或饱和度监测结果,将能更好地判断边坡的稳定性变化趋势。




(a) 不同降雨历时下孔隙水压力与降雨强度的关系




(b) 不同降雨历时下饱和度与降雨强度的关系

**图 7 不同降雨历时下孔隙水压力、饱和度与降雨强度的关系**

**Fig. 7 Relationships Between Pore Water Pressure and Rainfall Intensity, and Saturation and Rainfall Intensity Under Different Rainfall Durations**

## 4 降雨阈值曲线的拟合及验证

降雨阈值曲线是指降雨强度与降雨历时阈值模型[31]。降雨强度随降雨历时的衰减关系为

$$I=a_1 D^{-b_1} \tag{3}$$

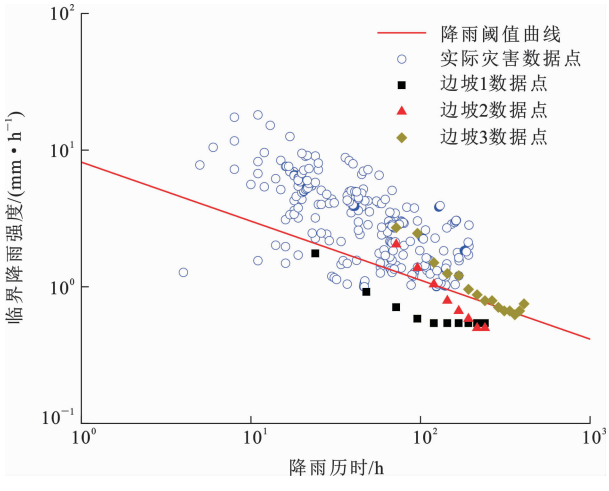
式中:$a_1$、$b_1$ 为曲线拟合参数。

式(3)表明:降雨历时越短,诱发地质灾害所需要的降雨强度越大;随着降雨历时的增加,诱发地质灾害所需要的降雨强度呈下降趋势[24]。式(3)可进一步改写为

$$\lg I=\lg a_1-b_1 \lg D \tag{4}$$

式(4)表明降雨强度与降雨历时在双对数坐标系中呈线性关系。根据式(4)可方便地判断边坡的稳定状态与降雨强度、降雨历时的关系。具体判断方式如下:①在双对数坐标系(lg $I$,lg $D$)中绘制降雨阈值曲线;②将实际降雨信息转化为($I$,$D$)数据点,绘制在降雨阈值曲线中;③某代表实际降雨信息的($I$,$D$)数据点落在降雨阈值曲线附近或上方,表示在当前降雨强度和降雨历时下边坡发生地质灾害概率较大,需要及时发布预警信息,保护生命财产安全;若($I$,$D$)数据点远离并处于该曲线下方时,表示当前降雨强度和降雨历时下边坡较为稳定,不易发生地质灾害。

对图 3 所示边坡临界降雨强度与降雨历时的所有数据点($I$,$D$)根据式(4)进行线性拟合,得到降雨阈值曲线的表达式为 $I=8.17D^{-0.43}$(图 8)。为了验证该降雨阈值曲线的正确性,将安徽省地质环境监测总站收集到的 435 组诱发安徽省 2008~2022 年




黑色实心点为参与线性拟合的数据点

**图 8 由临界降雨强度确定的降雨阈值曲线**

**Fig. 8 Rainfall Threshold Curve Determined by Critical Rainfall Intensity**

地质灾害的历史灾害降雨数据绘制在图 8 中。从图 8 可以看出,大多数历史灾害数据点均位于降雨阈值曲线附近,且在该曲线上方的灾害数据点占总历史灾害数据点的 95%以上,从而验证了根据数值模拟得到的降雨阈值曲线的正确性和可靠性。因此,为了获得某一区域内的降雨阈值曲线,当历史灾害数据不足或有所缺失时,数值模拟不乏为一种优良的补充数据的手段,对地质灾害防控预警有重要参考价值。

## 5　结　语

(1)安徽省潜山县石庙组边坡、舒城县何家冲组边坡及宿松县觅仙泉边坡等 3 个小型边坡算例的临界降雨强度和极限降雨强度均随着降雨历时的增加而减小,并趋于稳定。稳定后的临界降雨强度小于 20 mm·$d^{-1}$,表明长期降雨后,即使是小雨也会对边坡的稳定性造成极大影响,凸显了前期降雨的重要性。利用边坡监测位置处孔隙水压力与饱和度的变化情况,进一步验证了在极限降雨强度下,边坡趋于饱和,因此此时安全系数达到最小值,后续降雨对边坡安全系数影响很小。

(2)通过临界降雨强度的降雨数据拟合了降雨阈值曲线,并采用安徽省历史地质灾害数据验证了该曲线的正确性。

(3)本文研究的边坡数量较少且地理位置不够集中。若是对同一区域内的多个边坡进行计算分析,可以得到更加可靠的、适用于小区域的降雨阈值曲线,使降雨防护预警系统更加具有针对性;另外,本文研究对象为小型、浅层滑坡,对大型、深层滑坡不适用。后续研究应对这些不足之处加以改进。

**参 考 文 献 :**

**References :**


[1] 赵付明,王　博,谢　超.安徽省地质灾害隐患点现状分析与研究[J].安徽地质,2016,26(2):143-145.
ZHAO Fu-ming,WANG Bo,XIE Chao. Analysis and Study of Current Situation of Spots of Hidden Geological Hazards in Anhui Province[J]. Geology of Anhui,2016,26(2):143-145.

[2] XU J S,DU X L,ZHAO X,et al. Analytical Stability Analysis of Rainfall-infiltrated Slopes Based on the Green-Ampt Model[J]. International Journal of Geomechanics,2023,23(2):0002647.

[3] ZHANG S X,LI L,ZHAO D S,et al. Stability and Time-delay Effect of Rainfall-induced Landslide Considering Air Entrapment[J]. Geoscience Letters,2022,9:8.

[4] HOU T S,DUAN X,LIU H Y. Study on Stability of Exit Slope of Chenjiapo Tunnel Under Condition of Long-term Rainfall[J]. Environmental Earth Sciences,2021,80(17):590.

[5] LI Z,HE Y J,LI H,et al. Antecedent Rainfall Induced Shallow Landslide: A Case Study of Yunnan Landslide,China[J]. Scientia Iranica,2019,26(1):202-212.

[6] NOBAHAR M,KHAN M S,IVOKE J. Combined Effect of Rainfall and Shear Strength on the Stability of Highway Embankments Made of Yazoo Clay in Mississippi[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2020,38(3):2787-2802.

[7] SONG X,LI H. Analysis of Rainfall Infiltration Stability of High Liquid Limit Red Clay Roadbed in Africa[J]. Computational Intelligence and Neuroscience,2022,2022:8222075.

[8] ZHOU T B,ZHANG L F,CHENG J,et al. Assessing the Rainfall Infiltration on FOS via a New NSRM for a Case Study at High Rock Slope Stability[J]. Scientific Reports,2022,12:11917.

[9] JIANG S,LI J Y,ZHANG S,et al. Landslide Risk Prediction by Using GBRT Algorithm: Application of Artificial Intelligence in Disaster Prevention of Energy Mining[J]. Process Safety and Environmental Protection,2022,166:384-392.

[10] XU X,XING Y C,GUO Z,et al. Stability Analysis of Rainfall-triggered Toe-cut Slopes and Effectiveness Evaluation of Pile-anchor Structures[J]. Journal of Earth Science,2021,32(5):1104-1112.

[11] CHEN C Y,CHEN H W,WU W C. Numerical Modeling of Interactions of Rainfall and Earthquakes on Slope Stability Analysis[J]. Environmental Earth Sciences,2021,80(16):524.

[12] SU Z Y,WANG Y K,ZHANG H. Study on the Failure Mechanism,Safety Grading and Rainfall Threshold of Landslide Caused by Typhoon Rainstorm[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2022,40(4):2201-2211.

[13] SU Z Y,CHEN G Y,MENG Y. Study on Seepage Characteristics and Stability of Core Dam Under the Combined Action of the Variation of Reservoir Water Level and Rainfall[J]. Geotechnical and Geological Engineering,2021,39(1):193-211.

[14] NAZRIEN J,MOHD A,RAZALI I H,et al. The Effect of Extreme Rainfall Events on Riverbank Slope

Behaviour[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022,10:859427.

[15] DUAN X,HOU T S,JIANG X D. Study on Stability of Exit Slope of Chenjiapo Tunnel Under Extreme Rainstorm Conditions[J]. Natural Hazards,2021,107(2):1387-1411.

[16] WANG Y X,CHAI J R,CAO J,et al. Effects of Seepage on a Three-layered Slope and Its Stability Analysis Under Rainfall Conditions[J]. Natural Hazards, 2020,102(3):1269-1278.

[17] 朱 武,张 勤,朱建军,等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发[J]. 岩土工程学报,2022,44(7):1341-1350.
ZHU Wu,ZHANG Qin,ZHU Jian-jun,et al. Real-time Monitoring and Early Warning Technology for Huge Landslides[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(7):1341-1350.

[18] LAN H X,MARTIN C D,ZHOU C H,et al. Rockfall Hazard Analysis Using LIDAR and Spatial Modeling [J]. Geomorphology,2010,118(1/2):213-223.

[19] LAN H X,TIAN N M,LI L P,et al. Kinematic-based Landslide Risk Management for the Sichuan-Tibet Grid Interconnection Project(STGIP) in China[J]. Engineering Geology,2022,308:106823.

[20] 张 勤,白正伟,黄观文,等. GNSS 滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报,2022,51(10):1985-2000.
ZHANG Qin, BAI Zheng-wei, HUANG Guan-wen, et al. Review of GNSS Landslide Monitoring and Early Warning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2022,51(10):1985-2000.

[21] LI L P,LAN H X,GUO C B,et al. A Modified Frequency Ratio Method for Landslide Susceptibility Assessment[J]. Landslides,2017,14(2):727-741.

[22] 兰恒星,伍法权,周成虎,等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报,2003,48(5):507-512.
LAN Heng-xing,WU Fa-quan,ZHOU Cheng-hu,et al. Spatial Analysis Prediction of Rainfall Landslide Risk Based on GIS[J]. Chinese Science Bulletin,2003,48(5):507-512.

[23] LAN H X,ZHOU C H,WANG L J,et al. Landslide Hazard Spatial Analysis and Prediction Using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China[J]. Engineering Geology,2004,76(1/2):109-128.

[24] 李子豪,王 钧,郭婷婷,等. 基于降雨强度-历时的安徽省黄山市滑坡分组阈值研究[J]. 水土保持通报,2022,42(1):184-190.
LI Zi-hao, WANG Jun, GUO Ting-ting, et al. Landslide Classification Threshold in Huangshan City of Anhui Province Based on Rainfall Intensity-duration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(1):184-190.

[25] SALA G,LANFRANCONI C,FRATTINI P,et al. Cost-sensitive Rainfall Thresholds for Shallow Landslides[J]. Landslides,2021,18(9):2979-2992.

[26] SUN D L,GU Q Y,WEN H J,et al. A Hybrid Landslide Warning Model Coupling Susceptibility Zoning and Precipitation[J]. Forests,2022,13(6):827.

[27] FREDLUND D G,HOUSTON S L. Protocol for the Assessment of Unsaturated Soil Properties in Geotechnical Engineering Practice[J]. Canadian Geotechnical Journal,2009,46(6):694-707.

[28] 徐 全,谭晓慧,沈梦芬. 降雨入渗条件下土质边坡的稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2012,34(增 1):254-259.
XU Quan,TAN Xiao-hui,SHEN Meng-fen. Stability Analysis of Soil Slopes Under Rainfall Infiltration [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(S1):254-259.

[29] FREDLUND D G,RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons,1993.

[30] GB/T 32864—2016,滑坡防治工程勘查规范[S].
GB/T 32864—2016,Code for Geological Investigation of Landslide Prevention[S].

[31] GUZZETTI F,PERUCCACCI S,ROSSI M,et al. The Rainfall Intensity-duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows: An Update[J]. Landslides, 2008,5(1):3-17.